



Research
Animal Nutrition and Feed Science—Article

利用六氟化硫示踪技术预估不同年龄阶段的放牧荷斯坦奶牛甲烷排放量

Steven J. Morrison^a, Judith McBride^a, Alan W. Gordon^b, Alastair R. G. Wylie^b, 闫天海^{a,*}

^a Agri-Food and Biosciences Institute, Hillsborough, County Down BT26 6DR, UK

^b Agri-Food and Biosciences Institute, Belfast BT9 5PX, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 March 2017

Revised 8 May 2017

Accepted 9 May 2017

Available online 17 May 2017

关键词

甲烷排放量

放牧奶牛

预测

六氟化硫示踪技术

摘要

动物和日粮因素对牛肠道甲烷排放量影响的相关研究已经很普遍，但是关于放牧青年奶牛的甲烷排放量的可参考数据较少。本研究评估了荷斯坦奶牛在多年生黑麦草地放牧时的生理状态对甲烷排放量的影响，分别进行了以下两个试验：试验1从2011年5月开始，为期11个星期，试验2从2011年8月开始，为期10个星期。在每个试验中，将荷斯坦奶牛分成三个处理组（每组12头），分别由小牛犊、一岁的母牛犊和妊娠母牛组成（平均年龄分别为8.5、14.5和20.5月龄）。在每个试验的最后一个星期利用六氟化硫示踪技术预估每头牛的甲烷排放量。干物质摄入量由代谢能需要量除以牧草中的代谢能含量计算而得。正如预期一样，活体重随年龄的增加而增加（ $P < 0.001$ ），然而试验1中三个分组的体增重没有差异，试验2中的体增重随着年龄增加有不同程度的减少（ $P < 0.001$ ）。在试验1中，妊娠母牛高于小牛犊的甲烷排放量（ $P < 0.001$ ），而一岁母牛犊的甲烷排放量最高（ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ）。当用单位活体重、干物质摄入量和总能摄入量表示甲烷排放量时，一岁母牛犊比小牛犊和妊娠母牛的排放速率更高（ $P < 0.001$ ）。在试验2中，甲烷排放量（ $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ）随着年龄增加呈线性上升（ $P < 0.001$ ），但是这种差异在一岁母牛犊和妊娠母牛中并不显著。妊娠母牛的甲烷/活体重的比值低于另外两组（ $P < 0.001$ ），小牛犊的总能摄入量中甲烷能量输出的比值低于一岁母牛犊和妊娠母牛（ $P < 0.05$ ）。根据所有数据建立甲烷排放量的预测方程。所有关系均为显著（ $P < 0.001$ ）， R^2 值的分布范围为0.630~0.682。这些模型表明：每增加1 kg活体重，甲烷排放量增加0.252 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ；每增加1 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 干物质摄入量，甲烷排放量增加14.9 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ；每增加1 $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 总能摄入量，甲烷能量输出增加0.046 $\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ 。当实际甲烷排放量不可测时，这些结果为我们提供了预估放牧母牛甲烷排放量的另一种方法。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

乳制品生产是温室气体的重要来源[1]。在全球范围内，乳制品生产造成了人为温室气体总量的2.7%，而由于奶牛（包括运输、肉产品和畜力）造成的温室气体占总量的4%左右[2]。甲烷（ CH_4 ）和二氧化氮（ NO_2 ）是乳制品行业产生的主要温室气体，分别占温室气体总量

的50%以上和30%~40%[3]。因此，如何获得更多的精确数据预估不同乳制品生产系统的甲烷排放总量得到越来越多的关注。文献记载了世界许多关于评估动物和日粮因素对成年奶牛甲烷排放量影响的研究[3,4]，但是鲜有研究犊牛的[5]。而且，定量犊牛肠溶甲烷排放量的相关信息也很少。研究不同生理状态和饲喂不同日粮的犊牛，如果用成年牛的预测模型预测青年牛的甲烷排放量会产

* Corresponding author.

E-mail address: tianhai.yan@afbini.gov.uk

生系统误差。相关信息的缺乏会影响乳制品生产系统的甲烷排放量数据的获取和适当缓解措施的采取。

Johnson等[6]研发了六氟化硫(SF₆)示踪技术,广泛应用于评估畜牧业的甲烷排放量。此技术用惰性示踪气体SF₆作为标记物,每天从牛的口鼻呼出的气体中收集样本来计算甲烷排放量。据报道,该技术有一定的局限性,如渗透管放在牛瘤胃中时间过长可能会使SF₆的释放速率减小,但是预估的甲烷排放量与用呼吸测热计直接测量的相差无几[7,8]。因此,本研究的目的是:①利用SF₆示踪技术定量后备母牛的CH₄排放量;②评估荷斯坦奶牛的年龄和生理状态对CH₄排放量的影响;③利用数据建立基于动物和日粮因素下青年畜群CH₄排放量的预测方程。

2. 技术与方法

本研究是在英国邓恩郡希尔斯堡的农业食品和生物科学研究所(AFBI)的农场进行的。它符合英国1986年颁布的动物(科学程序)法令的要求,并得到希尔斯堡AFBI伦理审查小组的批准。

2.1. 动物、试验设计和放牧管理

来自希尔斯堡AFBI的72头荷斯坦奶牛被分配在两个放牧期(试验1和试验2),各36头。根据试验开始时的年龄将母牛分配在每个试验中处理组的三个生长阶段(每组12头)。处理组分别为:牛犊(5~10月龄)、一岁的母牛犊(12~17月龄)、后备母牛(18~23月龄)。后备母牛通过人工授精而受孕,24月龄时分娩。试验1中,36头牛在2011年的放牧季节早期在同一牧场放牧11个星期(5月16日至7月29日),该牧场主要生长多年生黑麦草。试验2与试验1的管理相似,将第二组36头牛放牧10个星期(2011年8月15日至10月21日)。将每个试验的放牧区域划分为16个均为1.6 hm²的小牧场。试验1采用主从式放牧系统,额外增加的非试验母牛组(6~11月龄)作为小牛犊处理组的从动组和一岁母牛犊或后备母牛的领导组。由于不利的天气和土地环境,试验2采用独立轮作牧场系统。每头牛都不饲喂补充饲料。

2.2. 牧场和动物管理

放牧前后每天用测草盘测量牧草高度,在W形的牧场里获得40个随机记录[9]。每天在W形牧场里采集

放牧前具有代表性的牧草样本。使用Gardena Accu 6号充电式剪刀采集样本(Kress和Kastner, Weiterstadt, 德国)。有代表性的牧草采集高度是根据之前的观察值和消费数据确定的。根据Park等[10]的描述,用近红外光谱法(NIRS)分析新鲜牧草样本的代谢能含量,剩下的样本切成40~50 mm长,冻干,然后再粉碎、混合并通过湿化学法检测中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、氮(N)、灰分和水溶性碳水化合物(WSC)。根据Porter[11]描述的方法,总能(GE)用恒温弹式量热法检测(Parr Instruments Co., Moline, Illinois, 美国)。使用氮元素分析仪(Elementar Vario MAX CN; Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, 德国)通过杜马斯燃烧法测定氮元素,并用氮含量乘以6.25计算出粗蛋白质(CP)含量。根据Cushnahan和Gordon描述的方法,用Fibertec M 1020吸热器和1021冷提取器测定NDF和ADF含量(Tecator AB, Hoganas, 瑞典)[12]。在马弗炉550℃的环境下燃烧样品10 h后测得灰分含量。

每天用校准电子体重秤记录动物活体重(EziWeigh; TruTest Ltd., Auckland, 新西兰),并通过蓝牙助手传输至Psion手提式数据记录器。

2.3. 测量甲烷

对Johnson等[6]提出的SF₆示踪技术做细微修改后,用来评估每个试验的最后一个星期的4天内每头牛的甲烷排放量[8]。总而言之,试验1和试验2中包含SF₆的渗透管分别放置在每头牛瘤胃里7天和4天后,再开始测量CH₄浓度。根据Muñoz等[8]的描述,准备、校准和使用渗透管以及将渗透管随机分配给每头牛。在放入瘤胃前了解SF₆的释放速率和渗透管使用的有效期。试验1和试验2中,渗透管内SF₆的释放速率分别为3.99~6.09 mg·d⁻¹和4.15~6.37 mg·d⁻¹。用真空罐在动物鼻孔上方某点收集呼气样本,给小牛犊收集样本的真空罐容量为1.7 L,给一岁的母牛犊和后备母牛用的则为2.5 L的;使用前给容器抽真空的压强要超过900 mbar(1 mbar=100 Pa)。通过将不锈钢管卷起一小段长度,放置大约1 m的铁氟龙/PVC/硅胶的取样管来调节(减小)样本流动速率。测得小牛犊的样本流动速率为0.25~0.35 mL·min⁻¹,一岁的母牛犊和后备母牛的样本流动速率为0.35~0.45 mL·min⁻¹。根据Muñoz等[8]描述的方法,24 h后移去真空罐,并充大约500 mbar的N₂,然后再用气相色谱分析仪(GC)(Varian 3600 GC; Varian Inc., Palo Alto,

California, 美国) 测量呼气样本中CH₄和SF₆的含量。将一个容器放置在靠近试验牧场但是逆风的地方, 每天收集样品, 并测定样品中的空气中的SF₆和CH₄含量。在计算每个动物的CH₄排放量时都要将这些值考虑进去。甲烷排放量均预估的是每个试验的最后一个星期连续4天的收集期。

2.4. 计算牧草采食量

用ME采食量计算值除以牧草中的ME含量来估计牧草干物质(DM)摄入量(kg·d⁻¹), 牧草中的ME含量用近红外反射率分析[10]。通过ME摄入量计算维持需要(ME_m)和生长需要(ME_g)的ME总量、放牧强度限额、适合放牧场所、妊娠需要(ME_p)的ME。ME_m由Jiao等[5]建立的方程计算得出。放牧量通过农业和食品研究委员会(AFRC)给出的方程计算而得[13]。根据AFRC给出的生长所需净能[NE_g, MJ·d⁻¹; 式(1)]和ME利用率[k_g; Eq. (2)]可计算出ME_g[13]。

$$NE_g = \frac{(1.15 \times (4.1 + 0.0332 \times LW - 0.000009 \times LW^2))}{(1 - 0.1475 \times \Delta LW)} \quad (1)$$

$$k_g = 0.78 \times (ME/GE) + 0.006 \quad (2)$$

式中, LW为活体重; ΔLW为日增重(kg·d⁻¹), 通过活体重-时间的线性回归方程计算而得; ME和GE分别为牧草中的ME和GE含量(MJ·kg⁻¹ DM)。

怀孕所用能量和怀孕所需ME利用率(0.133)通过式(3)和式(4)计算而得, 符合AFRC的建议值[13]。

$$\log E_t = 151.665 - 151.64 \exp(-0.0000576t) \quad (3)$$

$$E_c = 0.025 \times W_c \times (E_t \times 0.0201 \exp(-0.0000576t)) \quad (4)$$

式中, E_c为怀孕的能量沉积(MJ·d⁻¹); E_t为总能量沉积(MJ); W_c为小牛初生重[13]; t为怀孕天数。

2.5. 统计分析

数据分析采用单向方差分析, 在每个试验中, 动物组作为处理因素。对每个处理来说, 如果差异显著, 用Fisher的最小显著差来评估不同处理(年龄组)间的两两差异。线性回归可以表示CH₄排放量和DM摄入量或者活体重的关系, 也可以表示CH₄能量输出(CH₄-E)和GE摄入量或ME摄入量之间的关系, 试验1和试验2所有的数据以及放牧季节都作为随机效应。

3. 试验结果

3.1. 牧草的营养价值

表1是试验1和试验2中牛吃的新鲜牧草的化学成分。本试验中的牧草品质与北爱尔兰的奶牛牧场普遍观测到的相同。试验1中牧草CP含量为160~235 g·kg⁻¹ DM, 试验2中的牧草CP含量略高于试验1中的。试验1(早中期放牧季节)的WSC含量的平均值、最小值、最大值高于试验2(中后期放牧季节)。但是, 两个试验的ADF和NDF含量的平均值差不多, 试验1的最小值低于试验2的。

3.2. 对活体重和采食量的影响

表2是试验1和试验2的活体重和采食量数据。不出所料, 两个试验中的活体重都随着母牛年龄的增加而增加(P < 0.001)。试验1中三个处理组的体增重相差无几, 试验2中处理组的体增重随着年龄增加而线性下降(P < 0.001)。两个试验中的干物质、总能和代谢能的摄入量随着年龄增加而显著增加(P < 0.001)。但是试验2中一岁的母牛犊和后备母牛的差异并不显著。

3.3. 对肠溶甲烷排放量的影响

表3是试验1和试验2的甲烷排放量数据。在试验1

表1 新鲜牧草的化学成分

	Mean	SD	Minimum	Maximum
Experiment 1				
Dry matter (g·kg ⁻¹)	161	31.8	110	219
Ash (g·kg ⁻¹ DM)	93	6.4	84	102
Gross energy (MJ·kg ⁻¹ DM)	18.5	0.30	18.1	19.0
Crude protein (g·kg ⁻¹ DM)	179	27.0	160	235
Acid detergent fiber (g·kg ⁻¹ DM)	233	21.8	199	266
Neutral detergent fiber (g·kg ⁻¹ DM)	490	38.8	417	544
Lipid (g·kg ⁻¹ DM)	42	6.8	35	52
Water-soluble carbohydrates (g·kg ⁻¹ DM)	169	26.2	139	213
Experiment 2				
Dry matter (g·kg ⁻¹)	145	22.0	112	215
Ash (g·kg ⁻¹ DM)	108	19.7	81	137
Gross energy (MJ·kg ⁻¹ DM)	18.5	0.30	18.0	19.0
Crude protein (g·kg ⁻¹ DM)	207	36.7	151	249
Acid detergent fiber (g·kg ⁻¹ DM)	247	8.0	237	261
Neutral detergent fiber (g·kg ⁻¹ DM)	492	26.9	454	549
Lipid (g·kg ⁻¹ DM)	35	4.2	31	40
Water-soluble carbohydrates (g·kg ⁻¹ DM)	117	34.2	60	162

中，一岁的母牛犊有最高的甲烷排放量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)，后备母牛产生的甲烷比小牛犊多 ($P < 0.001$)。当用每单位活体重或DM摄入量，或 CH_4 -E所占GE或ME摄入量比例的甲烷排放量表示时，一岁的母牛犊的排放速率高于小牛犊和后备母牛 ($P < 0.001$)。在试验2中， CH_4 排放量 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$) 随着动物年龄的增加而线性增加 ($P < 0.001$)，但是一岁母牛犊与后备母牛的差异并不显著。后备母牛的甲烷与活体重的比值低于另外两组 ($P < 0.001$)，小牛犊的总能或者ME摄入量中 CH_4 -E所占比例低于一岁母牛犊和后备母牛 ($P < 0.05$)。

3.4. CH_4 排放量与活体重以及采食量之间的关系

试验1和试验2获得的关于小牛犊、一岁母牛犊和后

备母牛的数据可以用来探讨 CH_4 排放量与活体重、饲料采食量和能量摄入量之间的关系。用两个试验 ($n=72$) 的处理组数据建立一系列方程[式(5)~(8)，表4]。图1和图2分别阐释了 CH_4 -E和GE采食量之间以及 CH_4 排放量和活体重之间的关系。所有关系都很显著 ($P < 0.001$)， R^2 的分布范围为0.630~0.682。这些方程表明每增加1 kg活体重， CH_4 排放量增加0.252 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 或者每增加1 $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ DM采食量， CH_4 的排放量增加14.94 $\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 。同时也表明了每增加1 $\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$ 的GE或ME摄入量， CH_4 -E会分别增加0.046 $\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$ 或者0.075 $\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

两个试验中的小牛犊 ($n=24$) 和一岁母牛犊 ($n=24$) 组也可以建立相似的关系。所有的结果都在表4中列出。一般来说，只用小牛犊组[式(9)~(12)]数据计算的

表2 试验1和试验2中母牛年龄对活体重和饲料采食量的影响

	Heifer age group			SE	P
	Calves (5–10 months)	Yearlings (12–17 months)	In-calf (18–23 months)		
Experiment 1					
Live weight (kg)	217 ^a	404 ^b	514 ^c	12.61	< 0.001
Live weight gain ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)	1.05	1.11	0.99	0.064	0.445
DM intake ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)	5.37 ^a	8.79 ^b	10.21 ^c	0.394	< 0.001
GE intake ($\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$)	101 ^a	161 ^b	186 ^c	7.3	< 0.001
ME intake ($\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$)	62 ^a	99 ^b	114 ^c	4.5	< 0.001
Experiment 2					
Live weight (kg)	246 ^a	411 ^b	520 ^c	17.12	< 0.001
Live weight gain ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.82 ^c	0.59 ^b	0.38 ^a	0.053	< 0.001
DM intake ($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)	5.34 ^a	6.95 ^b	7.91 ^b	0.370	< 0.001
GE intake ($\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$)	100 ^a	127 ^b	145 ^b	6.8	< 0.001
ME intake ($\text{MJ}\cdot\text{d}^{-1}$)	60 ^a	77 ^b	88 ^b	4.1	< 0.001

^{a,b,c} indicate that values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

表3 试验1和试验2中母牛年龄对肠溶甲烷排放量的影响

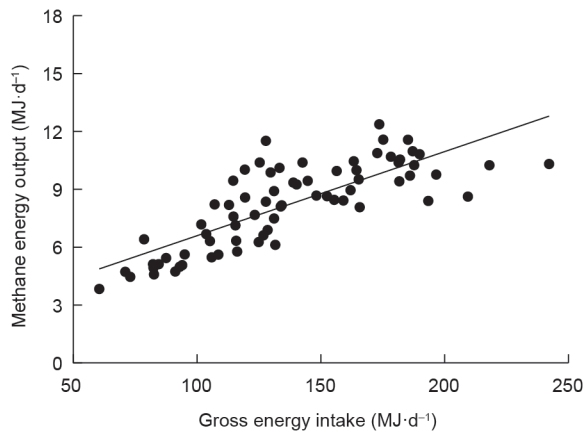
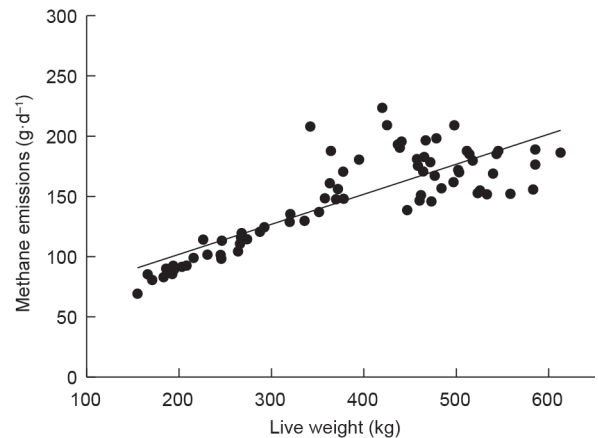
	Heifer age groups			SE	P
	Calves (5–10 months)	Yearlings (12–17 months)	In-calf (18–23 months)		
Experiment 1					
CH_4 emissions ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	98 ^a	189 ^c	172 ^b	5.6	< 0.001
CH_4 /live weight ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-0.75}$)	1.71 ^a	2.10 ^b	1.60 ^a	0.054	< 0.001
CH_4 /DM intake ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	18.5 ^a	21.7 ^b	17.1 ^a	0.74	< 0.001
CH_4 -E/GE intake ($\text{MJ}\cdot\text{MJ}^{-1}$)	0.055 ^a	0.066 ^b	0.052 ^a	0.0022	< 0.001
CH_4 -E/ME intake ($\text{MJ}\cdot\text{MJ}^{-1}$)	0.089 ^a	0.107 ^b	0.084 ^a	0.0037	< 0.001
Experiment 2					
CH_4 emissions ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	106 ^a	155 ^b	169 ^b	5.3	< 0.001
CH_4 /live weight ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-0.75}$)	1.72 ^b	1.72 ^b	1.56 ^a	0.029	< 0.001
CH_4 /DM intake ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	19.9	22.8	21.8	0.81	0.052
CH_4 -E/GE intake ($\text{MJ}\cdot\text{MJ}^{-1}$)	0.059 ^a	0.069 ^b	0.066 ^b	0.0025	0.016
CH_4 -E/ME intake ($\text{MJ}\cdot\text{MJ}^{-1}$)	0.098 ^a	0.114 ^b	0.109 ^{ab}	0.0041	0.025

^{a,b,c} indicate that values in the same row with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

表4 荷斯坦奶牛甲烷排放量的预测方程

Equations ^a	R ²	P	Eq. No.
Using data from calves, yearling heifers, and in-calf heifers in both Experiments 1 and 2 (n = 72)			
CH ₄ = 0.252 _(0.020) LW + 50.92 _(9.96)	0.682	< 0.001	5
CH ₄ = 14.94 _(1.28) DM intake + 36.77 _(11.08)	0.651	< 0.001	6
CH ₄ -E = 0.046 _(0.004) GE intake + 1.93 _(0.63)	0.639	< 0.001	7
CH ₄ -E = 0.075 _(0.007) ME intake + 1.93 _(0.66)	0.630	< 0.001	8
Using data from calves only in both Experiments 1 and 2 (n = 24)			
CH ₄ = 0.340 _(0.023) LW + 23.23 _(5.37)	0.910	< 0.001	9
CH ₄ = 13.80 _(1.31) DM intake + 27.89 _(8.31)	0.780	< 0.001	10
CH ₄ -E = 0.041 _(0.004) GE intake + 1.54 _(0.46)	0.783	< 0.001	11
CH ₄ -E = 0.066 _(0.006) ME intake + 1.57 _(0.49)	0.743	< 0.001	12
Using data from yearling heifers only in both Experiments 1 and 2 (n = 24)			
CH ₄ = 0.244 _(0.054) LW + 72.61 _(28.068)	0.253	< 0.001	13
CH ₄ = 10.40 _(2.467) DM intake + 89.51 _(21.028)	0.579	< 0.001	14
CH ₄ -E = 0.032 _(0.007) GE intake + 4.94 _(1.157)	0.582	< 0.001	15
CH ₄ -E = 0.052 _(0.012) ME intake + 4.92 _(1.15)	0.585	< 0.001	16

^a Values in parentheses are the SE of the coefficients or constants; units are g·d⁻¹ for CH₄ (methane emissions), kg for LW (live weight), kg·d⁻¹ for DM intake, and MJ·d⁻¹ for CH₄-E, GE, and ME intake.

图1. 荷斯坦奶牛总能摄入量与CH₄能量输出之间的关系。图2. 荷斯坦奶牛活体重与CH₄排放量之间的关系。

R²高于用所有处理组[式(5)~(8)]数据计算的R²,一岁母牛犊组[式(13)~(16)]的对应值低于用所有处理组数据计算的或者小牛犊组。后备母牛组的CH₄排放量与活体重、DM摄入量、GE摄入量或ME摄入量的关系并不显著,故不在这里列出。

4. 讨论

4.1. 母牛的年龄和生理状态对肠溶甲烷排放的影响

采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)给出的一级和二级排放系数评估英国奶牛的肠溶甲烷排放量[14,15]。值得注意的是,当计算青年畜群的CH₄排放量时不要漏掉计算CH₄能量损失比例。因为据估计,青年

畜群产生的CH₄排放量大约占英国奶业总肠溶CH₄排放量的20%[16],提高估计日粮能量的精确性、计算成年奶牛在特定的生长阶段的CH₄损失是有必要的,因为建立CH₄排放量的预测方程是基于GE和DM摄入量的。

直到最近,就日粮能量损失浪费来说,反刍畜牧业的CH₄排放量是相当大的,与日粮能量利用率相关的CH₄-E/GE采食量的平均值的IPCC推荐值为0.065[14]。在本研究中,所有年龄母牛的CH₄-E/GE采食量的平均处理比值分布为0.052~0.069。这些值与用测热室测得的泌乳奶牛的值很接近[13,17],与年龄在6~22月龄的小母牛和小公牛的值也很接近[5]。而且,本试验获得的甲烷相关数据与最近的利用SF₆示踪技术测得的数据相差无几。例如,Jiao等[18]曾报道如果饲喂荷斯坦奶

牛浓度为2~8 kg DM·d⁻¹ (该范围比本研究略低) 日粮, CH₄-E/GE采食量从0.059减少至0.053。Cavanagh等[19]从698头泽西-弗里赛奶牛测得的CH₄/DM采食量的平均值为18.2 g·kg⁻¹, 也落在本研究获得的数据范围(17.1~22.8 g·kg⁻¹)。Boland等[20]发现肉牛无论是放牧在高产还是低产牧场, 对CH₄/DM采食量(19.3 g·kg⁻¹ vs. 21.1 g·kg⁻¹)都没有显著影响, 其平均值(20.2 g·kg⁻¹)与本研究(20.3 g·kg⁻¹)非常接近。但是, 应该解释清楚如何用SF₆预估CH₄排放量的, 因为有证据显示SF₆示踪技术可能会产生误差。这些误差包括渗透管中SF₆释放速率非线性下降的风险、渗透管校准温度和动物受体瘤胃内部温度的影响[21], 有必要精确测量反刍动物的背景气体浓度[22]。

本研究两个试验中的GE摄入量从小牛犊到一岁母牛犊再到后备母牛是逐步增加的。后备母牛采食更多的DM, 但却比一岁母牛犊产生更低的CH₄/DM采食量和CH₄-E/ME采食量, 但是这种差异只在试验1是显著的。瘤胃功能和日粮组分通过瘤胃的流通动力学的改变有助于解释在幼畜、青年奶牛和成年奶牛上观察到的CH₄排放量的一些差异。Johnson K A 和 Johnson D E[23]暗示食糜流通速率影响CH₄的生成量, 更高的饲料采食量会促进瘤胃流通速率增加, 继而减少CH₄-E/GE采食量。Bannink等[24]认为预测CH₄排放量不能仅仅关注营养调节对整个消化和表观饲料利用率的影响, 也应该考虑到营养对瘤胃内部发酵情况和短链脂肪酸的形成以及瘤胃内氢的收支平衡的影响。

本研究中的所有动物都不给予任何补充饲料; 然而, 当独立分析不同生长阶段的奶牛时, 肠溶CH₄排放量是不同的。这个发现表明, 即使动物吃相同的牧草, 肠溶CH₄排放量也会被其他因素影响, 如动物年龄或其他, 动物个体变异来源目前还不是很清楚。Boadi等[25]和Grainger等[17]都观察了相当多数量的动物内和动物间(分别是奶牛和肉牛)的CH₄产生量的差异, 且动物获得的日粮类型是相同或相似的。在目前两个试验中获得的CH₄-E/GE采食量是在IPCC给出的标准之内的[14], 在美国进行的404次荷斯坦奶牛试验[26]得出了更大的CH₄-E/GE采食量范围(0.016~0.099), 但是在这个机构工作的闫天海等[17]报道, 有247头英国荷斯坦奶牛的值为0.037~0.101。这些数据进一步强调了CH₄-E/GE采食量存在更大的变异, 同时也表明我们需要进一步调查目标动物年龄和生长阶段、生理状态及日粮特性对CH₄排放量的影响。

4.2. 预估肠溶 CH₄ 排放量

从目前研究得到的数据可以用来建立一系列的关于青年奶牛(荷斯坦奶牛)的CH₄排放量的预测方程。与前人结果一致[27-29], 现有数据表明CH₄排放量与DM摄入量关系很大, 或许是因为增加了发酵底物[30]。闫天海等[31]和Mills等[32]用营养摄入量和CH₄排放量的相关模型建立了奶牛的预测方程。闫天海等[31]还用成年奶牛的活体重和奶产量作为CH₄的辅助预测因子建立了补充方程; 这个方程促进了商业农场的CH₄排放量的预测, 因为商业农场的采食量数据并不容易得到。

本研究得到的方程提供了为不同生长阶段和年龄的奶牛预估CH₄排放量的一种方法。从本质上来说, 活体重和CH₄排放量之间的线性关系反映了每增加1 kg奶牛活体重, CH₄排放量增加0.252 g·d⁻¹。Zhao等[33]也发现仅给绵羊饲喂新鲜牧草, 绵羊的活体重和CH₄排放量的关系显著。

英国和北爱尔兰的荷斯坦奶牛替代母牛饲养项目的目标是达成恒定的生长速率, 小母牛达成了这个目标, 第一头小牛犊在24月龄的体重是540~560 kg[34]。这个项目是假定繁殖年龄是13.5~15月龄[34]。本研究提供了一种预测放牧奶牛CH₄排放量的方法, 该方法是用动物的活体重作为决定性因素。这些方程以及CH₄排放量、DM和能量摄入量之间的关系, 向科学文献添加了有用的信息; 它们可以用来预估放牧母牛的CH₄排放量, 有助于提高国家牛的生产系统中CH₄排放量清单的精确性。

5. 结论

本研究发现, 当用GE摄入量所占比例表达放牧奶牛替代小母牛的CH₄-E时, 早期放牧季节其范围分布于0.052~0.066 MJ·MJ⁻¹, 后期放牧季节其范围分布于0.059~0.069 MJ·MJ⁻¹。这些结果与PICC[14]推荐的0.065 MJ·MJ⁻¹差不多。为战略和政策考量吸收数据时, 仅靠PICC[14]给的固定值去计算青年奶牛的CH₄排放量, 会产生重大误差。现有数据可以用来建立CH₄排放量的一系列方程, 当实际CH₄排放量数据不可得时, 可为预估奶牛CH₄排放量提供另一种方法。

Acknowledgements

The study was funded by the Department for Environ-

ment Food & Rural Affairs, the Scottish Government, the Department of Agriculture and Rural Development for Northern Ireland, and the Welsh Government, as part of the UK's Agricultural GHG Research Platform initiative. The authors thank the staff of the AFBI Hillsborough heifer unit and the laboratory for their valuable inputs to the study.

Compliance with ethics guidelines

Steven J. Morrison, Judith McBride, Alan W. Gordon, Alastair R. G. Wylie, and Tianhai Yan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] European Environment Agency. EEA greenhouse gas—Data viewer [Internet]. Copenhagen: European Environment Agency. [updated 2016 Dec 6; cited 2017 Jan 20]. Available from: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- [2] Food and Agriculture Organization. Greenhouse gas emissions from the dairy sector—A life cycle assessment [Internet]. Copenhagen: Food and Agriculture Organization. 2010 [cited 2017 Jan 20]. Available from: <http://www.fao.org/docrep/012/k7930e/k7930e00.pdf>.
- [3] Ellis JL, Kebreab E, Odongo NE, McBride BW, Okine EK, France J. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *J Dairy Sci* 2007;90(7):3456–66.
- [4] Yan T, Mayne CS, Gordon FG, Porter MG, Agnew RE, Patterson DC, et al. Mitigation of enteric methane emissions through improving efficiency of energy utilization and productivity in lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 2010;93(6):2630–8.
- [5] Jiao HP, Yan T, Wills DA, Carson AF, McDowell DA. Development of prediction models for quantification of total methane emission from enteric fermentation of young Holstein cattle at various ages. *Agric Ecosyst Environ* 2014;183:160–6.
- [6] Johnson K, Huylers M, Westberg H, Lamb B, Zimmerman P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. *Environ Sci Technol* 1994;28:359–62.
- [7] Grainger C, Clarke T, McGinn SM, Auldred MJ, Beauchemin KA, Hannah MC, et al. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer and chamber techniques. *J Dairy Sci* 2007;90(6):2755–66.
- [8] Muñoz C, Yan T, Wills DA, Murray S, Gordon AW. Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows. *J Dairy Sci* 2012;95(6):3139–48.
- [9] Dale AJ, Mayne CS, Laidlaw AS, Ferris CP. Effect of altering the grazing interval on growth and utilization of grass herbage and performance of dairy cows under rotational grazing. *Grass Forage Sci* 2008;63(2):257–69.
- [10] Park RS, Agnew RE, Gordon FJ, Steen RWJ. The use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) on undried samples of grass silage to predict chemical composition and digestibility parameters. *Anim Feed Sci Technol* 1998;72(1–2):155–67.
- [11] Porter MG. Comparison of sample preparation methods for the determination of the gross energy concentration of fresh silage. *Anim Feed Sci Technol* 1992;37(3–4):207–8.
- [12] Cushnahan A, Gordon FG. The effects of grass preservation on intake, apparent digestibility and rumen degradation characteristics. *Anim Sci J* 1995;60(3):429–38.
- [13] Agricultural and Food Research Council. Energy and protein requirements of ruminants. Report. Wallingford: CAB International; 1993.
- [14] Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Copenhagen: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); 2006.
- [15] Baggott SL, Cardenas L, Downes M, Garnett E, Jackson J, Li Y, et al. Greenhouse gas inventories for England, Scotland, Wales and Northern Ireland: 1990–2004. Report. Didcot: AEA Technology plc.; 2006 Nov. Report No.: AEAT/ENV/R/2318.
- [16] Crompton LA, Mills JA, Kliam KE, Reynolds CK. Effects of feeding milled rapeseed on methane emission and milk fatty acid composition in lactating dairy cows. *Adv Anim Biosci* 2011;2:75.
- [17] Yan T, Agnew RE, Gordon FJ, Porter MG. Prediction of methane energy output in dairy and beef cattle offered grass silage-based diets. *Livest Prod Sci* 2000;64(2–3):253–63.
- [18] Jiao HP, Dale AJ, Carson AF, Murray S, Gordon AW, Ferris CP. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. *J Dairy Sci* 2014;97(11):7043–53.
- [19] Cavanagh A, McNaughton L, Clark H, Greaves C, Gowan JM, Pinares-Patino C, et al. Methane emissions from grazing Jersey × Friesian dairy cows in mid lactation. *Aust J Exp Agric* 2008;48(2):230–3.
- [20] Boland TM, Quinlan C, Pierce KM, Lynch MB, Kenny DA, Kelly AK, et al. The effect of pasture pregrazing herbage mass on methane emissions, ruminal fermentation, and average daily gain of grazing beef heifers. *J Anim Sci* 2013;91(8):3867–74.
- [21] Deighton MH, Williams SRO, Lassey KR, Hannah MC, Boland TM, Eckard RJ, et al. Temperature, but not submersion or orientation, influences the rate of sulphur hexafluoride release from permeation tubes used for estimation of ruminant methane emissions. *Anim Feed Sci Technol* 2014;194:71–80.
- [22] Williams SRO, Moate PJ, Hannah MC, Ribaux BE, Wales WJ, Eckard RJ. Background matters with the SF₆ tracer method for estimating enteric methane emissions from dairy cows: A critical evaluation of the SF₆ procedure. *Anim Feed Sci Technol* 2011;170(3–4):265–76.
- [23] Johnson KA, Johnson DE. Methane emissions from cattle. *J Anim Sci* 1995;73(8):2483–92.
- [24] Bannink A, van Schijndel MW, Dijkstra J. A model of enteric fermentation in dairy cows to estimate methane emission for the Dutch National Inventory Report using the IPCC Tier 3 approach. *Anim Feed Sci Technol* 2011;166–7:603–18.
- [25] Boadi DA, Wittenberg KM, Kennedy AD. Validation of the sulphur hexafluoride (SF₆) tracer gas technique for measurement of methane and carbon dioxide production by cattle. *Can J Anim Sci* 2002;82(2):125–31.
- [26] Moe PW, Tyrell HF. Methane production in dairy cows. *J Dairy Sci* 1979;62(10):1583–6.
- [27] Blaxter KL, Clapperton JL. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *Br J Nutr* 1965;19(4):511–22.
- [28] McCaughey WP, Wittenberg K, Corrigan D. Methane production by steers on pasture. *Can J Anim Sci* 1997;77(3):519–24.
- [29] Hart KJ, Martin PG, Foley PA, Kenny DA, Boland M. Effect of sward dry matter digestibility on methane production, ruminal fermentation, and microbial populations of zero-grazed beef cattle. *J Anim Sci* 2009;87(10):3342–50.
- [30] Johnson DE, Ward GM, Ramsey JJ. Livestock methane: Current emissions and mitigation potential. In: Kornegay ET, editor. *Nutrient management of food animals to enhance and protect the environment*. New York: CRC Press Inc.; 1996. p. 219–33.
- [31] Yan T, Mayne CS, Porter MG. Effects of dietary and animal factors on methane production in dairy cows offered grass silage-based diets. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture*; 2005 Sep 20–24; Zurich, Switzerland. Amsterdam: Elsevier; 2006. p. 131–4.
- [32] Mills JA, Kebreab E, Yates CM, Crompton LA, Cammell SB, Dhanoa MS, et al. Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows. *J Anim Sci* 2003;81(12):3141–50.
- [33] Zhao YG, O'Connell NE, Yan T. Prediction of enteric methane emissions from sheep offered fresh perennial ryegrass (*Lolium perenne*) using data measured in indirect open-circuit respiration chambers. *J Anim Sci* 2016;94(6):2425–35.
- [34] Carson AF, Dawson LER, McCoy MA, Kilpatrick DJ, Gordon FJ. Effects of rearing regime on body size, reproductive performance and milk production during the first lactation in high genetic merit dairy herd replacements. *Anim Sci* 2002;74(3):553–65.